

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES SINCROFASORIALES EN
SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO TÉCNICAS DE CLUSTERIZACIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERA ELÉCTRICA**

**TEMA:
UBICACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES SINCROFASORIALES EN
SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO TÉCNICAS DE
CLUSTERIZACIÓN**

**AUTORA:
KATHY ALEXANDRA YANGUICELA CAIZA**

**TUTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito, octubre del 2016

AGRADECIMIENTO

Kathy Alexandra Yanguicela Caiza.

Agradezco a Dios por la vida, y por la luz que ha encendido día a día para guiarme por el buen camino, esta es la prueba de que la fé hacia él ha hecho posible este sueño de niña.

Agradezco también a la Universidad Politécnica Salesiana, institución que me abrió sus instalaciones para formarme no solo como profesional, sino como ser humano. A todos sus docentes y colaboradores que impartieron sus conocimientos y experiencias vividas y supieron extenderme su mano cuando yo lo necesité.

En especial quiero agradecer al Ing. Diego Carrión, que con su paciencia y conocimiento hizo posible la culminación de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Kathy Alexandra Yanguicela Caiza.

Dedico este trabajo a mis padres Nelson y Nancy que con su esfuerzo y trabajo arduo supieron darme la mejor educación que pude tener, junto con los valores necesarios para crecer feliz. A mis hermanos Freddy y Alan, para enseñarles que nada es imposible en la vida y que todo esfuerzo y sacrificio tiene su recompensa al final del camino.

A mi esposo Darwin que desde que lo conocí se convirtió en el pilar fundamental de mi vida, dándome ánimos cuando parecía desfallecer. Este logro sin duda también es suyo porque vivió conmigo todas las alegrías y frustraciones que conllevo mi larga vida universitaria.

Y como olvidarme de mi pequeña, mi hija adorada Damaris porque desde que estuvo en mi vientre le prometí no darme por vencida y luchar siempre por su bienestar y el de nuestro hogar. Esta es la prueba de que a pesar de tener tropiezos y dificultades siempre esa promesa estuvo presente en mí.
¡Esto es un ejemplo pequeña!; pero no quiero nunca que me iguales, sino que me superes.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría nombrar. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Gracias.

Kathy Alexandra Yanguicela Caiza

UBICACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES SINCRÓFASORIALES EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO TÉCNICAS DE CLUSTERIZACIÓN

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2016

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Kathy Alexandra Yanguicela Caiza.

Bachiller Técnico Industrial, especialidad Electricidad del Instituto Tecnológico Superior Aloasi. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su investigación aborda varias técnicas de agrupamiento para la ubicación óptima de medidores sincrofásoriales. Integrante del Grupo de Investigación GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes).

kyanguicela@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza.

Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador en el año 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín, Colombia. Es profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes).

dcarrion@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2016 Universidad Politécnica Salesiana – QUITO, ECUADOR.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “UBICACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES SINCROFASORIALES EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO TÉCNICAS DE CLUSTERIZACIÓN” realizado por Kathy Alexandra Yanguicela Caiza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, octubre 2016

.....

Diego Francisco Carrión Galarza

Cédula: 1713703062

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Kathy Alexandra Yanguicela Caiza, con documento de identificación N° 171893223-7, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Ubicación Óptima de Medidores Sincrofasoriales en Sistemas de Transmisión Usando Técnicas de Clusterización”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma

.....

Nombre: Kathy Alexandra Yanguicela Caiza

Cédula: 171893223-7

Fecha: Octubre, 2016

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
UBICACIÓN ÓPTIMA DE PMUs.....	3
2.1 Ubicación óptima de PMUs en sistemas de transmisión.....	3
2.2 Unidades de medición fasorial (PMUs).....	4
TÉCNICAS DE CLUSTERIZACIÓN.....	4
3.1 K-means.....	5
3.2 K-medoids.....	6
CASO DE ESTUDIO.....	6
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	7
CONCLUSIONES.....	8
REFERENCIAS.....	9
7.1 Estado del Arte.....	11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Recogimiento de datos mediante PMU.....	4
Figura 2. Topología del sistema IEEE de 14 barras.....	7
Figura 3. Topología del sistema IEEE de 30 barras.....	7
Figura 4. Ubicación de 4 PMUs en el sistema de 14 barras mediante algoritmo Kmeans.....	7
Figura 5. Ubicación de 4 PMUs en el sistema de 14 barras mediante algoritmo Kmedoids.....	8
Figura 6. Ubicación de 10 PMUs en el sistema de 30 barras mediante algoritmo Kmeans.....	8
Figura 7. Ubicación de 10 PMUs en el sistema de 30 barras mediante algoritmo Kmeans.....	8

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultado de los algoritmos. Sistema IEEE de 14 barras.....	8
Tabla 2. Resultado de los algoritmos. Sistema IEEE de 30 barras.....	8
Tabla 3. Matriz del estado de arte.....	11
Tabla 4. Resumen e Indicadores del estado de arte.....	13

UBICACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES SINCROFASORIALES EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO TÉCNICAS DE CLUSTERIZACIÓN

Resumen

En la presente investigación se analizó varias técnicas de clusterización con el fin de identificar y determinar la cantidad y la ubicación óptima de Unidades de Medición Fasorial (PMUs) en un sistema eléctrico de potencia (SEP), buscando determinar la menor cantidad de dispositivos a ser utilizados y por ende reducir los costos de implementación del sistema de medición sincrofasorial. En el estado del arte se detallan varios métodos que se pueden desarrollar para la predicción de dichos lugares óptimos, pero la presente investigación se centró en estudiar los algoritmos K-means y K-medoids que son métodos de agrupación basados en distancias, es decir, para el caso de estudio se agruparon cierta cantidad de dispositivos basándose en la mínima distancia que existe entre ellos. Una vez simulados los dos métodos de clusterización propuestos en esta investigación, se determinó cuáles son las barras óptimas para alojar los PMUs según los métodos estudiados en el presente documento.

Palabras Clave: K-means, K-medoids, Líneas de Transmisión, Observabilidad, Técnicas de clusterización, Ubicación de PMUs.

Abstract

In this research several clustering techniques were performed in order to identify and determine the quantity and the optimal location of Phasor Measurement Units (PMUs) in an electrical power system (EPS), seeking to determine the least amount of devices to be used and thus reducing the implementation cost of the synchrophasorial measurement system. There are several methods that are detailed in the literature review that can be developed in order to predict these optimal locations, but the present research is focused on studying the K-means and K-medoids algorithms that are clustering methods based on distances, that is, in our case a certain number of devices are grouped based on the minimum distance between them.

Once simulated the two clustering methods proposed in this investigation, it will be determined which are the optimal buses for placing the PMUs.

Keywords: K-means, K-medoids, Transmission Lines, Observability, Clustering Techniques, PMUs location.

1. Introducción

Una de las metas de la estimación de estados en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) es calcular precisamente dichos estados que están directamente inmedibles, a partir de conjuntos de mediciones disponibles sobre la base de las relaciones físicas entre ellos o mejorar la precisión de los estados observables utilizando las matemáticas [1]. Hasta hace poco, estos conjuntos de medición no contenían medidas de ángulo de fase debido a las dificultades técnicas asociadas con la sincronización de estas medidas en localizaciones remotas. La introducción de la tecnología de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) aminoró estas dificultades y condujo al desarrollo de Unidades de Medición Fasorial (PMU) con las cuales se mejoró significativamente la estimación de estados en los SEP [2].

La idea de usar mediciones fasoriales directas en aplicaciones de monitoreo de sistemas, incluyendo el caso específico de la estimación de estados no es nueva, ya por los años 1986, en las investigaciones realizadas por Phadke y sus colaboradores [3]-[4] se introduce el uso de PMUs para tales aplicaciones. La literatura cita dos importantes métodos para la ubicación óptima de PMUs: métodos basados en la topología y métodos numéricos. Los métodos basados en la topología usan un modelo de medición desacoplado y teoría de grafos. En estos métodos las decisiones tomadas son basadas en operaciones lógicas, por lo tanto, solo requieren información sobre la conectividad de la red, tipos de medición y sus ubicaciones. Los métodos numéricos, por otra parte, utilizan modelos de medición, ya sea completamente acoplados o desacoplados. Estos métodos se basan en la factorización numérica de la matriz Jacobiana. Los métodos numéricos no son muy eficientes para sistemas grandes porque están intrínsecamente relacionados con el manejo de grandes matrices y tienen mayor complejidad computacional. Por lo tanto, los métodos basados en la topología son

mucho más utilizados [5]. T. L. Baldwin y L. Mili plantean en [6] que cada PMU es capaz de medir los valores de voltaje y corriente de la barra asociada a la misma y además de todas las ramas incidentes. Por lo tanto, es posible reducir significativamente el número de PMUs a ubicar en el sistema y aun así lograr la observabilidad completa del sistema.

El problema de la ubicación óptima de PMUs ha sido abordado en la literatura científica desde diferentes perspectivas y se han usado disímiles métodos y algoritmos tales como la teoría de grafos [7], el procedimiento de búsqueda dual (Dual Search) [6], la programación entera [2], algoritmos genéticos de clasificación no dominada [8], programación lineal entera [9] y Simulated annealing algorithm [10].

El objetivo de este trabajo es encontrar el mínimo número de PMUs de tal forma que el sistema sea completamente observable usando técnicas de clusterización. La validez del método propuesto fue probada en los sistemas IEEE de 14 y 30 barras.

En adelante el documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se realizó un estudio de las PMUs y los criterios de observabilidad más usados. En la sección 3 se expone sobre las técnicas de clusterización, específicamente de los métodos k-means y k-medoids, que son los algoritmos utilizados en el desarrollo de la presente investigación; la que fue llevada a cabo en los sistemas IEEE de 14 y 30 barras los cuales son mostrados en la sección 4 y obteniendo los resultados requeridos, éstos fueron analizados en la sección 5. Finalmente se realizan las conclusiones de la investigación en la sección 6.

2. Ubicación Óptima de PMUs

El uso e implementación de sistemas de monitoreo utilizando PMUs se ha extendido a diferentes países y regiones alrededor de todo el mundo con muy buenos resultados, ofreciendo la posibilidad de desarrollar un control más

avanzado basado en la toma de decisiones dentro de un sistema eléctrico en tiempo real, un ejemplo de esto son los Sistemas de Monitoreo en Áreas Extendidas (WAMS), en las cuales diferentes compañías del sector eléctrico han ampliado el uso de PMUs para el desarrollo de aplicaciones como el monitoreo de la estabilidad de tensión, análisis post falla, la validación de modelos, la restauración de sistemas y otras como la protección adaptativa, el control en tiempo real y la ya mencionada estimación de estados [11].

Además, el análisis de la observabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia tiene un rol fundamental en el desarrollo de algoritmos basados en la topología de la red en busca de optimizar la cantidad y ubicación de PMUs para el efectivo análisis del SEP. Es además el criterio que debe cumplir cada algoritmo para que este sea debidamente validado.

2.1 Ubicación Óptima de PMUs en Sistemas de Transmisión

Como criterio principal para determinar la ubicación óptima de las PMUs, debe mantenerse un compromiso entre cantidad de PMUs ubicadas y la observabilidad del sistema.

Para el análisis de la observabilidad en métodos del tipo topológico, han sido definidas ciertas reglas que simplifican el análisis del sistema. En los siguientes párrafos se pueden encontrar las reglas de observabilidad más usadas en este tipo de aproximación [6].

Para barras con PMUs, siempre serán conocidos los fasores de voltaje y corriente de todas las barras incidentes y si dichos fasores son conocidos a un extremo de la barra, entonces el fasor de voltaje al otro extremo de la barra puede ser obtenido. Además, si los fasores de voltajes de ambos extremos de una barra son conocidos, entonces el fasor de corriente de esa barra puede obtenerse directamente.

Para una barra de inyección cero en un sistema de N barras tenemos:

$$\sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j = 0 \quad (1)$$

donde Y_{ij} es el elemento ij de la matriz de admitancia del sistema y V_j es el fasor de voltaje para la barra j .

Si el fasor de voltaje de una barra de inyección cero es desconocido, y los fasores de voltaje de las barras adyacentes son todos conocidos, entonces el fasor de voltaje de la barra de inyección cero puede ser encontrado con (1); por lo tanto, si existe un grupo de barras de inyección cero adyacentes, cuyos fasores de voltajes se desconocen, pero los fasores de voltaje de todas las barras adyacentes al grupo son conocidos, entonces los fasores de voltaje de las barras de inyección cero pueden ser encontrados también con (1).

Para lograr la completa observabilidad del sistema se ha estimado que las PMUs deben estar ubicadas en un mínimo de un 30% a un 40% de las barras [12].

Uno de los algoritmos utilizados para la ubicación de las PMUs es el conocido como Ramificación y acotamiento (Branch and Bound) [2]-[13]-[14] el mismo plantea que para un sistema de N barras el modelo de optimización sería el siguiente:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N w_i x_i \\ \text{st. } f(x) \geq \hat{1} \end{aligned} \quad (2)$$

donde w_i es el costo de instalación de la PMU en el bus i , X es una variable binaria que queda definida en (3) y $f(x)$ es una función que representa la topología del sistema.

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si la barra tiene un PMU} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 Unidades de Medición Fasorial (PMU)

Las unidades de medición fasorial, son dispositivos electrónicos inteligentes (IED's) por sus siglas en inglés, que nos permiten medir sincrofasores de las ondas sinusoidales de corriente y voltaje AC en las diferentes barras de un sistema eléctrico.

Después de tomar dichas medidas la PMU calcula las corrientes y voltajes de secuencia positiva y de acuerdo a la señal que obtiene del GPS se asignan a estos nuevos datos calculados un tiempo exacto y único en el que han realizado las mediciones. Dicho sistema GPS es utilizado para identificar la ubicación precisa de la PMU y además como señal de tiempo para dar a conocer de manera exacta el microsegundo en el cual se realizó la medición para que toda esta información que recoge la PMU pueda ser enviada a un concentrador de datos que se encuentra ubicado en un lugar apropiado para que ahí dichos datos puedan ser monitoreados, analizados y corregidos en el caso que sea necesario.

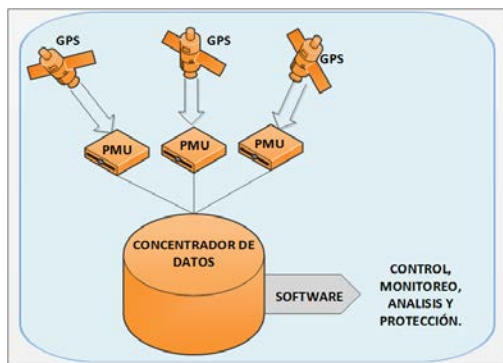


Figura 1. Recogimiento de datos mediante PMU.

En la Figura 1 se puede observar los pasos que siguen los PMU para la sincronización y la obtención de los datos.

3. Técnicas de Clusterización

Analizando el problema presentado en esta investigación desde una aproximación basada en la topología de la red, la teoría de grafos aporta importantes elementos que complementan el estudio realizado. Esta ha sido ampliamente utilizada para dar solución a diferentes problemas en el

campo de la Ingeniería. En [15] se presenta un algoritmo para encontrar el camino más corto para el enrutamiento de potencia entre dos nodos de una red eléctrica usada en las aerolíneas. S. Tsuzuki expone en [16] la metodología del árbol de mínima expansión para el análisis de observabilidad de redes basadas en topología. En 1977 se analiza en [17] la reducción de pérdidas de energía en sistemas de distribución aplicando un algoritmo de búsqueda general a una red de potencia de Brasil. La investigación realizada en [18] debate sobre la utilización del algoritmo de Dijkstra en varias aplicaciones como redes eléctricas de aerolíneas la cual es la principal ventaja del algoritmo.

De la teoría de grafos nace un conjunto de algoritmos que son llamados algoritmos voraces o codiciosos (greedy algorithms) que, para resolver un determinado problema, siguen una heurística consistente en elegir la opción óptima en cada paso local con la finalidad de llegar a una solución general óptima. Este esquema algorítmico es el que menos dificultades plantea a la hora de diseñar y comprobar su funcionamiento y normalmente se aplica a los problemas de optimización. Dentro de este grupo podemos citar a tres de los más utilizados.

1) Algoritmo de Prim: Este es un algoritmo de la teoría de grafos que encuentra un árbol de expansión mínima para un grafo conexo, no dirigido y cuyas aristas están etiquetadas [19].

2) Algoritmo de Dijkstra: Este algoritmo, también llamado algoritmo de caminos mínimos, es utilizado para determinar el camino más corto dado un vértice origen al resto de los vértices en un grafo con pesos en cada arista. Su nombre se refiere a Edsger Dijkstra, quien lo describió por primera vez en 1959.

3) Algoritmo de Kruskal: Este algoritmo, al igual que el de Prim, es usado para encontrar el árbol de expansión mínima en un grafo conexo y ponderado. Es decir, busca un subconjunto de aristas que,

formando un árbol, incluyen todos los vértices y donde el valor total de todas las aristas del árbol es el mínimo. Si el grafo no es conexo, entonces busca un bosque expandido mínimo (un árbol expandido mínimo para cada componente conexa) [20]-[21].

Dentro del proceso de clusterización o clustering, que consiste en la división de los datos en grupos de objetos similares. Para medir la similaridad entre objetos se suelen utilizar diferentes formas de distancia: distancia euclídea, de Manhattan, de Mahalanobis, etc. El presentar los datos por una serie de clústeres, conlleva a la pérdida de detalles, pero consigue la amplificación de los mismos. La clusterización es una técnica de aprendizaje no supervisado y su campo de aplicación es muy diverso [22].

Dentro de los métodos de agrupamiento o clusterización existen varios algoritmos por los cuales se puede llegar a determinar la ubicación óptima de un PMU en sistemas eléctricos de potencia. Esta investigación se centró en las técnicas de clusterización, dentro de las cuales se estudiaron dos algoritmos que ayudaron a agrupar de manera óptima los PMU utilizando como modelo los sistemas propuestos por la IEEE. Estos algoritmos son: k-means y k-medoids.

3.1 K-means

K-means es un método de agrupamiento que realiza una repartición de n números de datos en k conjuntos tomando en cuenta que cada dato debe pertenecer al conjunto más cercano con la media encontrada.

Este método de agrupamiento heurístico toma la distancia Euclídea como principal ecuación para calcular la distancia entre los puntos vectoriales.

Este algoritmo empieza determinando el número de k grupos y se asume el centro de éstos para luego determinar la distancia desde cada dato al centro de cada grupo y agruparlos con base a la distancia mínima que se encuentre. Estos pasos son repetitivos hasta que los datos ya no se

muevan de grupo. A continuación, describimos el algoritmo [23]:

Algoritmo de k-means

Paso 1: Inicialización del centro de los clústeres

$$u_i = \text{algún valor}; i = 1, 2, \dots, k$$

Paso 2: Selección del medoide más cercano a cada elemento

$$c_i = \{j: d(x_j u_i) \leq d(x_l u_i), l \neq i, j = 1 \dots n\}$$

Paso 3: Establecer los elementos de cada clúster.

$$u_i = \frac{1}{|c_i|} \sum_{j \in c_i} x_j, \forall i$$

$|c_i|$ es el número de elementos del clúster

Paso 4: Repetir desde los pasos 2 y 3 hasta converger.

La distancia de cada dato utilizando la distancia euclídea (4):

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n \sqrt{(z_{kj} - v_{ki})^2} \quad (4)$$

donde D_{ij} , es la matriz que almacena las distancias de cada punto de la matriz de datos a cada centro de grupo o centroide, z_{kj} es la matriz de datos y v_{ki} es la matriz de centroides.

3.2 K-medoids

El algoritmo k-medoids es un método de agrupación parecido al k-means; éstos dos algoritmos son particionales, es decir, que rompen un conjunto de datos para formar subgrupos y ambos tienen como objetivo principal minimizar la distancia entre los puntos marcados y el centro de cada grupo o clúster formado. A diferencia del

algoritmo k-means, el k-medoids elige puntos como medoides y no como centros, es decir, toma como referencia un objeto ya existente en el clúster pudiendo ser este medoide el objeto más central de dicho clúster. Además, el número de grupos a formar son conocidos a priori.

Una herramienta útil para determinar la cantidad k de grupos es la silhouette que es un método de interpretación y validación de coherencia dentro del grupo de datos que tenemos.

Este método se vuelve más robusto a diferencia del método k means debido a que en lugar de minimizar la suma de las distancias euclidianas al cuadrado, solo se encarga de minimizar una suma de diferencias por pares.

El proceso que usa este algoritmo está basado en la creación de particiones alrededor de los medoides (PAM) por sus siglas en inglés y el algoritmo es el siguiente [23]:

Algoritmo de k-medoids

Paso 1: Inicialización del centro de los clústeres

$$u_i = \text{algún valor}; i = 1, 2, \dots, k$$

Paso 2: Selección del medoide más cercano a cada elemento

$$c_i = \{j: d(\varphi, \gamma_j, u_i) \leq d(\varphi, \gamma_l, u_i), l \neq i, j = 1 \dots n\}$$

Paso 3: Establecer los elementos de cada clúster.

$$u_i = \frac{1}{|c_i|} \sum_{j \in c_i} \varphi, \gamma_j, \forall i$$

$|c_i|$ es el número de elementos del clúster

Paso 4: Repetir desde los pasos 2 y 3 hasta converger.

El costo se calcula empleando la distancia de Manhattan (5):

$$\text{cost}(x, c) = \sum_{i=1}^d |x_i - c_i| \quad (5)$$

donde x es cualquier objeto de datos, c es el medoide, y d es la dimensión del objeto.

4. Caso de Estudio

Como se mencionó anteriormente, el uso de PMUs en el análisis y monitoreo de Sistemas Eléctricos de Potencia va tomando cada vez más terreno, pero se mantiene constante la problemática de cuántas y dónde ubicarlas, atendiendo a un compromiso entre cantidad mínima de PMUs y observabilidad del sistema.

En la presente investigación se analiza el SEP desde un enfoque topológico y a través de la teoría de grafos se elabora un gráfico del mismo a partir de la matriz de conectividad del sistema, lo que permita agrupar coherentemente sus barras mediante los métodos de clusterización descritos anteriormente y finalmente ubicar las PMUs en las barras seleccionadas por el Algoritmo.

A partir de los modelos de la IEEE de 14 y 30 barras mostrados en las figuras 3 y 4 respectivamente, haciendo uso de la herramienta computacional Matlab, se procesa la matriz de conectividad de estos sistemas, a partir de la cual se procede a crear un grafo conexo de estos.

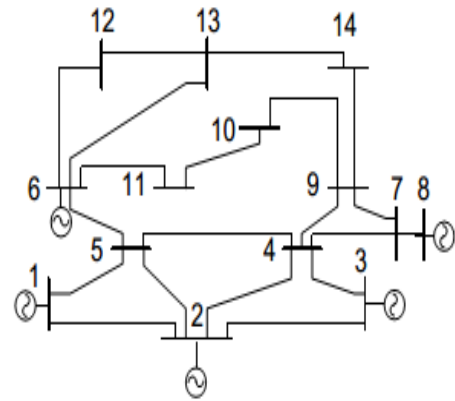


Figura 2. Topología del Sistema IEEE de 14 barras [24]

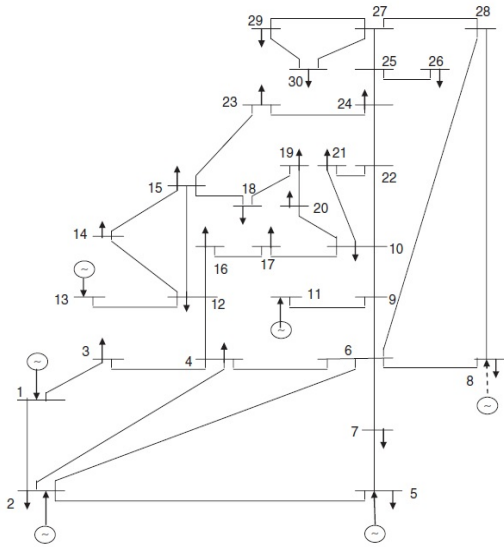


Figura 3. Topología del Sistema IEEE de 30 barras [25]

Una vez generado el grafo se extraen las coordenadas cartesianas de cada barra o vértice y se pasan estos datos a los algoritmos k-means y k-medoids, para que estos ubiquen las PMUs en las barras más óptimas en base a la mínima distancia entre las barras de un clúster y el centroide del mismo.

5. Análisis de Resultados

Para evaluar el método propuesto se corrieron los algoritmos en los Sistemas IEEE de 14 y 30 barras. En este documento se presentará en detalles los resultados para el sistema de 14 barras, mientras que para el de 30 barras solo se presentarán los resultados finales.

El Algoritmo K-means particiona el set de datos en la cantidad de clústeres definidos por el usuario, y asigna un centroide aleatorio y un subconjunto de datos a cada uno de estos clústeres, moviendo los centroides en cada iteración hasta que el algoritmo converja y cada subconjunto de datos se encuentre más cerca de su centroide que de los restantes.

En este punto habría que encontrar cuál de las barras de cada clúster se encuentra más cerca del centroide, para esto se usa un algoritmo de Prim, el que se encarga de ubicar finalmente cada PMU en la barra más cercana de cada centroide. En la figura

6 puede observarse la ubicación final de los PMUs en el Sistema IEEE de 14 barras usando el algoritmo k-means.

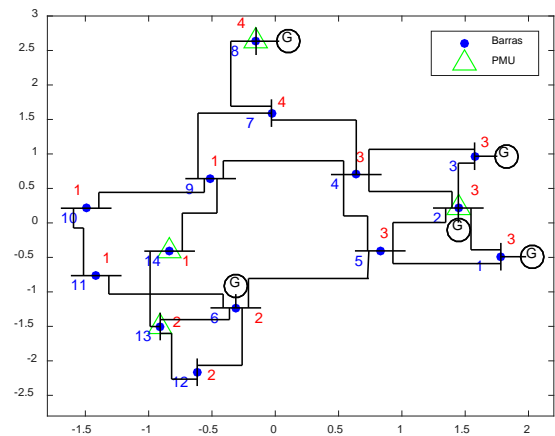


Figura 4. Ubicación de 4 PMUs en el Sistema IEEE de 14 barras mediante algoritmo K-means

Por otra parte, el Algoritmo K-medoids, ubica directamente los centroides en una de las barras de cada clúster, y como puede observarse en la figura 7, se obtienen los mismos resultados que con K-means, pero con menor esfuerzo de cómputo.

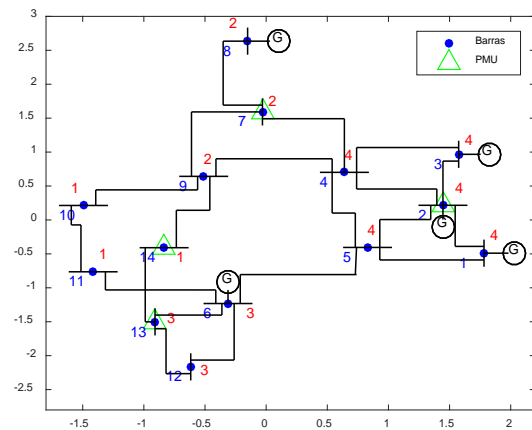


Figura 5. Ubicación de 4 PMUs en el Sistema IEEE de 14 barras mediante algoritmo K-medoids

Con el mismo procedimiento se muestran los resultados obtenidos para el sistema IEEE de 30 barras en las figuras 8 y 9 con los algoritmos k-means y k-medoids respectivamente.

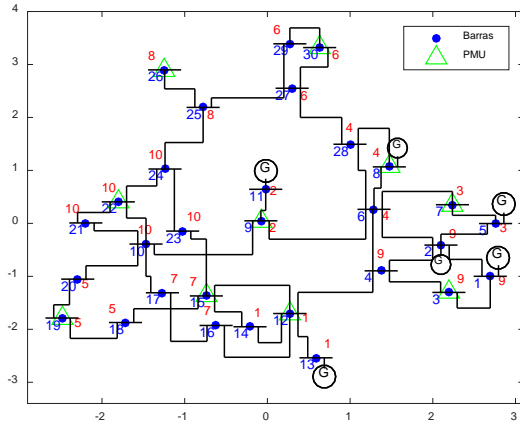


Figura 6. Ubicación de 10 PMUs en el Sistema IEEE de 14 barras mediante algoritmo K-means

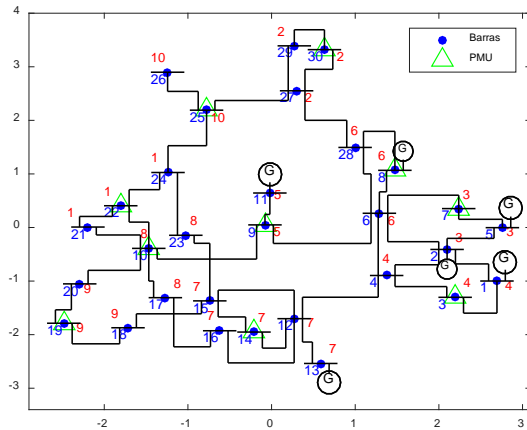


Figura 7. Ubicación de 10 PMUs en el Sistema IEEE de 14 barras mediante algoritmo K-medoids

Tabla1. Resultado de los algoritmos. Sistema IEEE de 14 barras

Algoritmo	Barras en las que se ubican las PMUs
K-means	2, 8, 13 y 14
K-medoids	2, 7, 13 y 14

Tabla2. Resultado de los algoritmos. Sistema IEEE de 30 barras

Algoritmo	Barras en las que se ubican las PMUs
K-means	3, 7, 8, 9, 12, 15, 19, 22, 26, y 30
K-medoids	3, 7, 8, 9, 10, 14, 19, 22, 25, y 30

Los resultados finales de los algoritmos propuestos para los dos sistemas de prueba

analizados son mostrados en las tablas 1 y 2.

6. Conclusiones

En la presente investigación se presentó una nueva aproximación a la problemática de la ubicación óptima de Unidades de Medición Fasorial en Sistemas Eléctricos de Potencia, basada fundamentalmente en una optimización en base a distancias y mediante técnicas de clusterización.

A partir de los algoritmos k-means y k-medoids, y con una aproximación topológica, se elaboraron dos programas para el análisis de los sistemas de la IEEE de 14 y 30 barras, y con ellos se optimizó la ubicación de PMUs en los mismos basados en la mínima distancia entre las barras.

Al comparar los dos algoritmos utilizados es posible apreciar que ambos arrojan los resultados similares, y son efectivos en tanto que convergen en los vértices más cercanos de cada centroide; pero se pudiera destacar la ventaja del algoritmo k-medoids sobre el k-means ya que el primero ubica directamente las PMUs en la barra calculada, mientras que en el segundo es necesario introducir un algoritmo adicional para la selección final de las barras.

Referencias

- [1] Z. Kun, "Impact of input uncertainties on power system state estimation robustness," KTH Vetenskap Och Konst, 2008.
- [2] X. Bei, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," *PSERC Publication*, pp. 5–20, 2005.
- [3] A. Phadke, J. Thorp, and K. Karimi, "State estimation with phasor measurements," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 1, pp. 233–238, 1986.

- [4] A. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *Computer Applications in Power, IEEE*, vol. 6, no. 2, pp. 10–15, 1993.
- [5] B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal placement of PMUs for power system observability using topology based formulated algorithms," *Journal of Applied Sciences*, vol. 9, no. 13, pp. 2463–2468, 2009.
- [6] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen Jr, and R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 2, pp. 707–715, 1993.
- [7] M. A. Rios and O. Gómez, "Identification of coherent groups and PMU placement for inter-area monitoring based on graph theory," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 2011 IEEE PES Conference on*, 2011, pp. 1–7.
- [8] B. Milošević and M. Begović, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 69–75, 2003.
- [9] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 4, pp. 1812–1820, 2008.
- [10] E. A. A. Hurtado, R. A. H. Isaza, and R. A. G. Rendón, "Ubicación óptima de PMUs en sistemas de transmisión para estimación de estado usando un algoritmo de Recocido Simulado," *Scientia et Technica*, vol. 18, no. 3, pp. 471–480, 2013.
- [11] J. E. Villa Moya, "Ubicación óptima de los PMU en un sistema eléctrico de potencia," Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [12] D. J. Brueni and L. S. Heath, "The PMU placement problem," *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, vol. 19, no. 3, pp. 744–761, 2005.
- [13] W. Ongsakul and T. Kerdchuen, "Optimal measurement placement with single measurement loss contingency for power system state estimation using refined Genetic Algorithm," in *28th Electrical Engineering Conference (EECON28), Phuket, Thailand*, 2006.
- [14] G. Grigoras, G. Cartina, and M. Gavrilas, "Using of Clustering Techniques in Optimal Placement of Phasor Measurements Units," in *IASME International Conference on ELECTRIC POWER SYSTEMS*, Genova; Italy, 2009, pp. 104–108.
- [15] L.-M. Jin and S.-P. Chan, "An electrical method for finding suboptimal routes," in *Circuits and Systems, 1989., IEEE International Symposium on*, 1989, pp. 935–938.
- [16] H. Mori and S. Tsuzuki, "A fast method for topological observability analysis using a minimum spanning tree technique," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 2, pp. 491–500, 1991.
- [17] C. Cavellucci and C. Lyra, "Minimization of energy losses in electric power distribution systems by intelligent search strategies," *International Transactions in Operational Research*, vol. 4, no. 1, pp. 23–33, 1997.
- [18] A. Mota, L. Mota, and A. Morelato, "Dynamic evaluation of reenergization times during power systems restoration," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, 2004, pp. 161–166.
- [19] T. Sudhakar and K. Srinivas, "Power system reconfiguration based on Prim's algorithm," in *Electrical Energy Systems (ICEES)*,

- 2011 1st International Conference on, 2011, pp. 12–20.
- [20] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to algorithms*, vol. 6. MIT press Cambridge, 2001.
 - [21] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. Gonzalez, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *Latin America Transactions*, vol. 14, no. 6, 2016.
 - [22] M. Garre, J. J. Cuadrado, M. A. Sicilia, D. Rodriguez, and R. Rejas, “Comparación de diferentes algoritmos de clustering en la estimación de coste en el desarrollo de software,” *Revista Española de Innovación, Calidad e Ingeniería del Software*, vol. 3, no. 1, pp. 6–22, 2007.
 - [23] D. Carrión, E. Inga, J. Gonzalez, and R. Hincapié, “Optimal Geographical Placement of Phasor Measurement Units based on Clustering Techniques,” in *UPEC 2016 - 51st International Universities’s Power Engineering Conference*, Coimbra; Portugal, 2016.
 - [24] Y. Hou, S. Liu, and Z. Qin, “Construction of System Restoration Strategy with PMU Measurements,” *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 377–386, 2011.
 - [25] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, Second Edi. New Jersey, 2015.